

2005

10/524314  
PCT/JP 2004/002033

20. 2. 2004

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2003年 2月27日  
Date of Application:

出願番号 特願2003-050541  
Application Number:  
[ST. 10/C]: [JP 2003-050541]

出願人 住友特殊金属株式会社  
Applicant(s): 高エネルギー加速器研究機構長

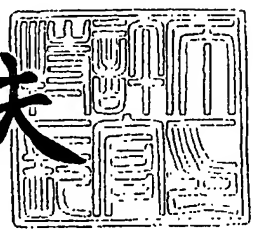
REC'D 13 APR 2004  
WIPO | PCT

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 3月25日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 SS02128A

【提出日】 平成15年 2月27日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01F 7/02

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府三島郡島本町江川2丁目15番17号 住友特殊  
金属株式会社 山崎製作所内

【氏名】 槇田 顕

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府三島郡島本町江川2丁目15番17号 住友特殊  
金属株式会社 山崎製作所内

【氏名】 杉山 英二

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府三島郡島本町江川2丁目15番17号 住友特殊  
金属株式会社 山崎製作所内

【氏名】 青木 雅昭

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府三島郡島本町江川2丁目15番17号 住友特殊  
金属株式会社 山崎製作所内

【氏名】 村上 嘉一

【発明者】

【住所又は居所】 茨城県つくば市大穂1番地1 高エネルギー加速器研究  
機構内

【氏名】 川久保 忠通

【発明者】

【住所又は居所】 茨城県つくば市大穂1番地1 高エネルギー加速器研究  
機構内

【氏名】 中村 英滋

## 【特許出願人】

【識別番号】 000183417

【氏名又は名称】 住友特殊金属株式会社

## 【特許出願人】

【識別番号】 391012707

【氏名又は名称】 高エネルギー加速器研究機構長

## 【代理人】

【識別番号】 100101683

【弁理士】

【氏名又は名称】 奥田 誠司

## 【手数料の表示】

【予納台帳番号】 082969

【納付金額】 21,000円

## 【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9908800

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 粒子線加速器用永久磁石および磁界発生装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 吸収線量 3, 0 0 0 G y 以上の放射線に被曝される環境で使用される粒子線加速器用永久磁石であって、

R (希土類元素のうちの少なくとも 1 種)、B (硼素)、および TM (遷移元素のうち少なくとも 1 種で、F e を含有するもの)、および不可避免的に含まれる不純物元素を含有し、

パーミアンス係数が 0. 5 以上の着磁状態にあり、かつ保磁力  $H_{cJ}$  が 1. 6 M A / m 以上の焼結磁石である粒子線加速器用永久磁石。

【請求項 2】 前記焼結磁石の組成比は、

R : 2 5. 0 ~ 4 0. 0 質量%、

B : 0. 8 ~ 1. 2 質量%、

不可避免的に含まれる不純物元素、および

TM : 残部である、請求項 1 に記載の粒子線加速器用永久磁石。

【請求項 3】 R が N d および / または P r を必須元素として含む請求項 1 または 2 に記載の粒子線加速器用永久磁石。

【請求項 4】 R が D y および / または T b を更に含む請求項 3 に記載の粒子線加速器用永久磁石。

【請求項 5】 TM が磁石全体の 1. 0 質量% 以下の C o を含む請求項 1 から 4 のいずれかに記載の粒子線加速器用永久磁石。

【請求項 6】 吸収線量 3, 0 0 0 G y 以上の放射線に被曝される環境で使用される磁界発生装置であって、

磁界発生空間を形成するように略環状に配置された複数の永久磁石を備えており、

前記永久磁石は、

R (希土類元素のうちの少なくとも 1 種)、B (硼素)、および TM (遷移元素のうち少なくとも 1 種で、F e を含有するもの)、および不可避免的に含まれる不純物元素を含有し、

パーミアンス係数が 0.5 以上での着磁状態にあり、かつ保磁力  $H_{cJ}$  が 1.6 MA/m 以上である磁界発生装置。

【請求項 7】 前記焼結磁石の組成比は、

R : 25.0 ~ 40.0 質量%、

B : 0.8 ~ 1.2 質量%、

不可避免的に含まれる不純物元素、および

TM : 残部である、請求項 6 に記載の磁界発生装置。

【請求項 8】 前記複数の永久磁石は、前記磁界発生空間を挟んで対向する第 1 磁石および第 2 磁石を含み、

前記第 1 磁石および第 2 磁石は、前記磁界発生空間の中央部を通る直線であって前記中央部における磁界方向に平行な直線に沿って配列されている、請求項 7 に記載の磁界発生装置。

【請求項 9】 前記複数の永久磁石によって構成される磁石体の形状は、前記直線を含む第 1 の平面に関して略対称であるが、前記直線を含み前記第 1 の平面に垂直な第 2 の平面に関しては非対称である、請求項 8 に記載の磁界発生装置。

【請求項 10】 前記磁石体の外周面の少なくとも一部は強磁性体によって覆われている請求項 9 に記載の磁界発生装置。

【請求項 11】 前記複数の永久磁石は、

前記第 1 磁石を挟みこむ位置に配置された第 3 磁石および第 4 磁石と、

前記第 2 磁石を挟みこむ位置に配置された第 5 磁石および第 6 磁石と、

を含み、

前記第 2 の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第 3 磁石のサイズは、前記第 2 の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第 4 磁石のサイズより小さく、

前記第 2 の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第 5 磁石のサイズは、前記第 2 の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第 6 磁石のサイズより小さい、請求項 9 または 10 に記載の磁界発生装置。

【請求項 12】 前記複数の永久磁石は、

前記第 4 磁石と前記第 6 磁石との間に配置された第 7 磁石を含んでいる請求項 11 に記載の磁界発生装置。

【請求項 13】 前記永久磁石の温度を室温よりも低い温度に保持する機構を更に備えている請求項 6 から 12 のいずれかに記載の磁界発生装置

【請求項 14】 前記第 1 磁石および前記第 2 磁石の対向面には、前記第 2 の平面からの距離に応じて厚さが変化する強磁性体が設けられている請求項 6 から 13 のいずれかに記載の磁界発生装置。

【請求項 15】 前記複数の永久磁石の各々は、直方体形状を有している請求項 6 から 13 のいずれかに記載の磁界発生装置。

【請求項 16】 請求項 6 から 15 のいずれかに記載の磁界発生装置と、前記磁界発生装置と放射線飛来源との間に配置された厚さ 0.1 mm 以上の遮蔽板と、  
を備えた粒子線加速器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、吸収線量 3,000 Gy 以上の放射線に被曝される環境で使用される永久磁石に関しており、特に、物性研究に使われるシンクロトロンや、放射線医療の分野で使われるサイクロトロンなどに用いることができる粒子線加速器用永久磁石に関する。また、本発明は、このような永久磁石を複数備えた磁界発生装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

粒子線加速器には、物性研究のための高エネルギー粒子線の発生に使われるシンクロトロンや、ガン検診に使われる放射性同位体を製造するための小型のサイクロトロンなどがある。最近では、診断だけでなく、陽子線をガン患者の患部に直接照射する放射線治療にも加速器が用いられ始めている。

【0003】

粒子線加速器は、粒子線を入射させる機構、電荷をもつ粒子に高周波電場を加えて加速するための機構、および粒子線を所望の方向に偏向させるための磁界を印加する機構を備えている。

## 【0004】

例えばシンクロトロンの場合は、主リングまたは蓄積リングと呼ばれる環状の軌道内で粒子線を走らせるための偏向磁界、軌道内の粒子線を収束させるための収束磁界、および、主リングへの粒子線の入射または主リングからの粒子線の取り出しのための偏向磁界が用いられる。一方、サイクロトロンの場合では、粒子線が渦巻き状に加速するための均一な静磁界が用いられる。

## 【0005】

従来、シンクロトロンおよびサイクロトロンのいずれについても、上記の磁界は、電磁石によって発生させられていた。

## 【0006】

粒子線加速器には、収束磁界のように原理的に磁界強度を可変とすることによって調整可能にしなければならない箇所もある一方、運転中は一定の静磁界が必要な箇所もある。シンクロトロンのビーム取出口では、主リングまたは蓄積リング中を走る粒子線に「キッカー磁石」と呼ばれる電磁石でパルス状の磁界を与えて粒子線のコースをわずかに変化させる。その粒子線は、更に「セプタム磁石」と呼ばれる電磁石によって大きく偏向されることになる。このようなセプタム磁石は、大きくて均一な静磁界を形成することが求められるとともに、粒子加速器の主リングの近くに設置されるため、セプタム磁石が強磁界を発生する空間（磁界発生空間）から外部の領域へ漏洩する磁界を可能な限り小さくする（例えば5 mT以下）ことが必要である。

## 【0007】

なお、サイクロトロンの場合は、前述のように、均一な静磁界を形成することが必要であるが、加速粒子として陽子を使用する場合、陽子は電子に比べて質量が大きいため、陽子を偏向するために1.0 T以上の強い静磁界が必要とされる。

## 【0008】

粒子線加速器用に用いられる磁石については、特許文献1から3などに記載されている。

## 【0009】

**【特許文献 1】**

特開昭 64-72502 号公報

**【特許文献 2】**

特開平 8-255726 号公報

**【特許文献 3】**

特開 2001-28300 号公報

**【0010】****【発明が解決しようとする課題】**

前述のように、粒子加速器用に用いられる電磁石は強い磁界を発生することが求められるため、動作に際して電磁石のコイルに大電流を流す必要がある。

**【0011】**

しかし、コイルに大電流を流すと、コイルで発生するジュール熱が多くなるため、この熱を速やかに取り除く必要があり、そのためにコイル周辺に冷却機構を設ける必要がある。

**【0012】**

更に、電磁石を用いる場合、電磁石の発生する断続的な強い磁界のため、電磁石を構成する各部材が破損しやすいという問題もある。また、電磁石に用いられる大量のヨーク材は、主として鉄からなるため、ビームラインから発生する放射線の照射によって放射化されやすい。放射化とは、加速粒子線などを照射された物質の一部が放射性核種に転換されて、自ら放射能を持つようになる現象である。ヨーク材が放射化されてしまうと、電磁石のメンテナンスのために作業者が電磁石に接近することが困難になる。

**【0013】**

このように、粒子加速器に電磁石を用いる場合に生じる種々の問題を避けるため、電磁石に代えて永久磁石を用いることが可能である。例えば、米国のフェルミ研究所における粒子加速器の蓄積リングには、ハードフェライト磁石が採用されている。ハードフェライトは、小型のままでは強い偏向磁界（例えば約 2 T）を発生することができず、小型の粒子加速器を病院などに普及させることができない。



## 【0014】

2-17系SmCo焼結磁石は、放射線照射による減磁が少なく、最大エネルギー積が $240\text{ kJ/m}^3$ を超える高性能磁石である。このため、粒子加速器のための強い磁界を発生するために、2-17系SmCo焼結磁石を用いることも可能である。しかし、この磁石の主要成分であり、かつ必須元素でもあるCoには、放射化しやすいという欠点があり、メンテナンスを考えると加速器への採用は難しい。

## 【0015】

Nd-Fe-B系焼結磁石は、最大エネルギー積が $320\text{ kJ/m}^3$ を超える高性能を発揮し得るため、加速器の小型化に威力を発揮、放射化も2-17系SmCo焼結磁石と比較して生じにくい利点がある。しかし、Nd-Fe-B系焼結磁石は、放射線の照射によって減磁しやすいという欠点を有している。

## 【0016】

図1を参照しながら、Nd-Fe-B系焼結磁石が放射線照射によって減磁するメカニズムを説明する。図1は、Nd-Fe-B系焼結磁石の一部を拡大した模式図である。図中の○は、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B型結晶を構成する原子を示している。相対的に小さな●は、エネルギー $E_0$ の放射線（高エネルギー粒子）を示しており、この粒子は、矢印に沿って飛行し、領域Rの中心に位置する原子に衝突するものとする。なお、放射線は、陽子線、中性子線、アルファ線、ベータ線、重イオン粒子線のような粒子線であってもよいし、ガンマ線、X線のような電磁波であってもよい。

## 【0017】

図1に示すように、放射線がNd-Fe-B系焼結磁石における原子内の原子核に衝突すると、衝突された原子がはじき飛ばされる場合もあるが、多くの場合、原子は弾き飛ばされず、入射エネルギー $E_0$ が熱として磁石に吸収され、衝突原子の周辺における格子振動を増大させる。その結果、領域Rで局所的な温度上昇が生じる。放射線のエネルギー $E_0$ が領域Rに吸収される前の温度を $T_L$ 、吸収後の温度を $T_H$ とすると、温度上昇の大きさは、 $\Delta T = T_H - T_L$ で表され、エネルギー $E_0$ に比例する。放射線照射後の温度 $T_H$ が磁石のキュリー温度 $T_C$ よりも

高くなる場合、磁石の保磁力  $H_{cJ}$  や領域  $R$  のパーミアンス係数  $P_C$  の大きさにかかわらず、領域  $R$  は冷却過程で磁化反転をおこす。Nd-Fe-B 系焼結磁石の保磁力発現メカニズムは、ニュークリエーション型であるため、領域  $R$  が磁気反転を引き起こすと、領域  $R$  を含む 1 つの結晶粒の全体が磁化反転を起こすことになる。このような磁化反転は、放射線の照射量が増えるにつれ、焼結磁石のあらゆる領域（結晶粒）で進行し、やがては焼結磁石の全体が大きく減磁する。

#### 【0018】

このようにして減磁が進むと、一定の強力な磁界を発生させることができず、したがって、従来の Nd-Fe-B 系焼結磁石を用いて粒子線加速器用磁界発生装置を作製することは実用化に至っていない。

#### 【0019】

本発明はかかる諸点に鑑みてなされたものであり、その主な目的は、Nd-Fe-B 系磁石を用いながら放射線照射によっても減磁しにくい粒子線加速器用永久磁石および磁界発生装置を提供することにある。

#### 【0020】

##### 【課題を解決するための手段】

本発明の粒子線加速器用永久磁石は、吸収線量 3,000 Gy 以上の放射線に被曝される環境で使用される粒子線加速器用永久磁石であって、 $R$ （希土類元素のうちの少なくとも 1 種）、 $B$ （硼素）、および  $TM$ （遷移元素のうち少なくとも 1 種で、 $Fe$  を含有するもの）、および不可避免的に含まれる不純物元素を含有し、パーミアンス係数が 0.5 以上の着磁状態にあり、かつ保磁力  $H_{cJ}$  が 1.6 MA/m 以上の焼結磁石である粒子線加速器用永久磁石。

#### 【0021】

好ましい実施形態において、前記焼結磁石の組成比は、 $R$ : 25.0 ~ 40.0 質量%、 $B$ : 0.8 ~ 1.2 質量%、不可避免的に含まれる不純物元素、および  $TM$ : 残部である。

#### 【0022】

好ましい実施形態においては、 $R$  が  $Nd$  および／または  $Pr$  を必須元素として含む。

## 【0023】

好ましい実施形態においては、RがDyおよび／またはTbを更に含む。

## 【0024】

好ましい実施形態においては、TMが磁石全体の1.0質量%以下のCoを含む。

## 【0025】

本発明の磁界発生装置は、吸収線量3,000Gy以上の放射線に被曝される環境で使用される磁界発生装置であって、磁界発生空間を形成するように略環状に配置された複数の永久磁石を備えており、前記永久磁石は、R（希土類元素のうちの少なくとも1種）、B（硼素）、およびTM（遷移元素のうち少なくとも1種で、Feを含有するもの）、および不可避免的に含まれる不純物元素を含有し、パーミアンス係数が0.5以上の着磁状態にあり、かつ保磁力 $H_{cJ}$ が1.6MA/m以上の焼結磁石である。

## 【0026】

好ましい実施形態において、前記焼結磁石の組成比は、R:25.0~40.0質量%、B:0.8~1.2質量%、不可避免的に含まれる不純物元素、およびTM:残部である。

## 【0027】

好ましい実施形態において、前記複数の永久磁石は、前記磁界発生空間を挟んで対向する第1磁石および第2磁石を含み、前記第1磁石および第2磁石は、前記磁界発生空間の中央部を通る直線であって前記中央部における磁界方向に平行な直線に沿って配列されている。

## 【0028】

好ましい実施形態において、前記複数の永久磁石によって構成される磁石体の形状は、前記直線を含む第1の平面に関して略対称であるが、前記直線を含み前記第1の平面に垂直な第2の平面に関しては非対称である。

## 【0029】

好ましい実施形態において、前記磁石体の外周面の少なくとも一部は強磁性体によって覆われている。

**【0030】**

好ましい実施形態において、前記複数の永久磁石は、前記第1磁石を挟みこむ位置に配置された第3磁石および第4磁石と、前記第2磁石を挟みこむ位置に配置された第5磁石および第6磁石とを含み、前記第2の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第3磁石のサイズは、前記第2の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第4磁石のサイズより小さく、前記第2の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第5磁石のサイズは、前記第2の平面に垂直な方向に沿って計測した前記第6磁石のサイズより小さい。

**【0031】**

好ましい実施形態において、前記複数の永久磁石は、前記第4磁石と前記第6磁石との間に配置された第7磁石を含んでいる。

**【0032】**

好ましい実施形態において、前記永久磁石の温度を室温よりも低い温度に保持する機構を更に備えている。

**【0033】**

好ましい実施形態において、前記第1磁石および前記第2磁石の対向面には、前記第2の平面からの距離に応じて厚さが変化する強磁性体が設けられている。

**【0034】**

好ましい実施形態において、前記複数の永久磁石の各々は、直方体形状を有している。

**【0035】**


本発明の粒子線加速器は、上記のいずれかの磁界発生装置と、前記磁界発生装置と放射線飛来線との間に配置された厚さ0.1mm以上の遮蔽板とを備えている。

**【0036】****【発明の実施の形態】**

図面を参照しながら、本発明の好ましい実施形態を説明する。

**【0037】**

図2は、本発明の永久磁石が好適に用いられる粒子線加速器の構成を模式的に



示している。

#### 【0038】

図2の粒子線加速器は、少なくとも、粒子線を加速するための主リングMRと、主リング中を走る粒子線に対してパルス状の磁界を及ぼすキッカー磁石Kと、キッカー磁石Kによって主リング内のコースから分離させられた粒子線を更に偏向するためのセプタム磁石S1、S2、S3とを備えている。

#### 【0039】

主リングMRやキッカー磁石Kの構成は、従来のものと同様であり、本実施形態で特徴的な点は、セプタム磁石の構成にある。このため、以下においては、セプタム磁石について、その詳細を説明する。

#### 【0040】

図3を参照する。図3は、セプタム磁石S1、S2、S3の少なくとも1つ（好ましくは全てのセプタム磁石）に用いられる本実施形態の磁界発生装置を示している。図3には、XYZ座標が示されている。この座標の原点は、ビームトランスポートラインが通る磁界発生空間の中央に位置しているものとする。Z軸方向は、ビームトランスポートライン内を飛行する粒子に及ぼされる磁界の向きに平行であり、Y軸方向は、ビームトランスポートライン内を飛行する粒子の進行方向に平行である。X軸方向は、ビームトランスポートライン内を飛行する粒子が陽子である場合に、その陽子に及ぶ力の向きに平行である。なお、粒子が電子などの負に荷電した粒子である場合、図3の磁界発生装置の構成のままでは、その粒子に及ぶ力がX軸方向に対して反平行となる。この磁界発生装置は、粒子に対してビームラインから離れる方向に力を付与する必要があるため、負に荷電している粒子の場合は、各永久磁石の磁化方向を反転し、磁界発生空間に形成する磁界の向きを-Z軸方向に一致させる必要がある。

#### 【0041】

本実施形態の磁界発生装置は、主リング内のビームラインの近くに配置され、かつ、ビームラインから分離したビームトランスポートラインに対して強い偏向磁界を付与するため、ビームトランスポートラインを取り囲むようにして複数の永久磁石が略リング状に配置されている。

## 【0042】

この磁界発生装置を構成する永久磁石は、何れも、Nd-Fe-B系焼結磁石であり、R（希土類元素のうち少なくとも1種）、B（硼素）、およびTM（遷移元素のうち少なくとも1種で、Feを含有するもの）、および不可避免的に含まれる不純物元素を含有している。好ましい形態では、R：25.0～40.0質量%、B：0.8～1.2質量%、TM：残部、および、不可避免的に含まれる不純物元素を含有している。また、本実施形態の磁石は、パーミアンス係数が0.5以上の着磁状態にあり、かつ、保磁力 $H_{cJ}$ が1.6 MA/m以上である。この永久磁石の組成や磁気特性などの詳細については、後述し、ここでは、この永久磁石によって構成される磁気回路を説明する。

## 【0043】

本実施形態の磁界発生装置は、それぞれが直方体形状を有する7つの永久磁石領域から構成され、これらの永久磁石を磁界発生空間の周りに略リング状に配列することによってハルバッハ型磁界回路に類似した磁気回路が形成されている。なお、各磁石領域は、図3に示す磁気回路を形成する複数の永久磁石のうち、第1磁石領域Aおよび第2磁石領域Bは、磁界発生空間を挟んで対向しており、磁界発生空間の中央部を通る直線（Z軸）に沿って配列されている。

## 【0044】

第3磁石領域Cおよび第4磁石領域Dは、第1磁石領域Aを挟みこむようにして第1磁石領域Aの両側に配置され、第5磁石領域Eおよび第6磁石領域Fは、第2磁石領域Bを挟みこむようにして第2磁石領域Bの両側に配置されている。また、第4磁石領域Dと第6磁石領域Fとの間には、第7磁石領域Gが配置されている。

## 【0045】

第1磁石領域Aおよび第2磁石領域Bの磁化方向は、磁界発生空間の中央部に形成する磁界の方向と一致し、Z方向を向いている。これに対し、第3磁石領域Cおよび第6磁石領域Fの磁化方向はX方向を向き、第4磁石領域Dおよび第5磁石領域Eの磁化方向は-X方向を向いている。第7磁石領域Gの磁化方向は-Z方向を向き、第1磁石領域Aおよび第2磁石領域Bの磁化方向とは反平行の関

係にある。

#### 【0046】

このように7つの永久磁石領域A～Gは、中央部に磁界発生空間を形成するように略リング状に配列されているが、完全なリング状構造は形成されおらず、ビームラインとビームトランスポートラインとの間には永久磁石の存在しない部分が設けられている。このため、図3に示す磁石体（磁気回路）は、厳密な意味では「ハルバッハ型」でなく、ギャップを有する「C型（コの字型）」の構造を有していることになる。

#### 【0047】

磁界発生空間の中央を通る前記の直線（Z軸）を含む第1の平面（XZ面）と、このZ軸を含み第1の平面に垂直な第2の平面（YZ面）を仮想的に考えると、7つの永久磁石領域A～Gによって構成される磁石体（磁器回路）の形状は、第1の平面（XZ平面）に関して略対称であるが、第2の平面（YZ面）に関しては非対称である。すなわち、YZ面に垂直な方向（X軸方向）に沿って計測した第3磁石領域Cおよび第5磁石領域Eのサイズ（X方向サイズ）は、第4磁石領域Dおよび第6磁石領域FのX方向サイズより小さくなるように設計されている。

#### 【0048】

このような左右非対称構造の磁気回路を採用する理由は、ビームラインとビームトランスポートラインとの間の距離が小さい場合においても、強力な磁界を発生させるためである。図2に示すセプタム磁石S1は、主リングMRに最も近い位置に置かれるが、従来のハルバッハ型構造の磁器回路を採用したならば、このような位置に置くことは困難になる。これに対し、本実施形態の構成によれば、図3に示す構成の磁界発生装置をセプタム磁石S1に用いることが可能となる。

#### 【0049】

なお、ビームラインとビームトランスポートラインとの分岐点では、粒子線照射による放射化が特に生じやすい。このため、放射化した部材からセプタム磁石への粒子線照射が問題になる。本実施形態では、後述するように、放射線照射によってほとんど減磁しない焼結磁石を採用しているが、それでも、可能な限り、

粒子線の照射量を低減することが好ましい。このため、磁石の表面と放射線の飛来源との間に遮蔽板を配置すると、磁石への被曝量を低減できるので好ましい。遮蔽板の厚さが0.1mm未満であると、被曝量の低減に効果があまりないので、遮蔽板の厚さは0.1mm以上であることが好ましい。遮蔽板の材料としては、例えば、熱中性子に対する散乱断面積の大きいボロンの同位体 $^{10}\text{B}$ や通常のボロンを多く含んだボロステンレス材などを用いることが好ましい。

#### 【0050】

また、磁石の温度を室温よりも低い温度に保持することが好ましい。磁石を冷却する機構を設けた場合、磁石温度が室温に略等しい場合に比べて保磁力が向上する。また、図1に示す領域Rの温度上昇後の温度 $T_H$ も低くなるため、被曝時の減磁が少なくなるため好ましい。

#### 【0051】

磁石を冷却する手段としては、液体窒素、液体ヘリウム、ドライアイスなどの寒剤を用いたり、循環型の冷媒やペルチェ素子を用いた冷凍装置を用いることができる。磁石を冷却する場合、RにNdを含めるかわりにPrを含有させれば、Nd系の磁石に見られる低温でのスピン再配列現象に伴う残留磁束密度の低下を防止することができるので好ましい。また、磁石材料の放射化を防止するには、TMにCoを含ませない組成にすることが好ましい。R-TM-B焼結磁石において、Coは必須元素ではないので、Coを含有させない磁石組成は極めて容易に実現できる。

#### 【0052】

本発明の磁石組成は、25.0～40.0質量%のR（希土類元素のうちの少なくとも1種）と、0.8～1.2質量%のB（硼素）とを含有し、残部がTM（遷移元素のうち少なくとも1種で、Feを含有する）である。ただし、不可避免的に含まれる不純物元素を含有していても良い。Rが25.0質量%未満であると、保磁力が低下し、Rが40.0質量%を越えると、残留磁束密度が低下する。Rの好ましい範囲は29.0～32.0質量%である。RがNdの他にDy、および／あるいはTbを含有すると、固有保磁力を高めることができるので更に好ましい。Dy、および／あるいはTbの磁石組成に占める割合は2.5質量%



以上であることが好ましい。B（硼素）が0.8質量%未満であると保磁力が低下し、1.2質量%を越えると残留磁束密度が低下する。TMがFeを含有しないと残留磁束密度が低下するので、TMはFeを必ず含む。TMにおけるFeの含有率は50質量%以上であることが好ましい。

#### 【0053】

本実施形態におけるR-TM-B系焼結磁石は、例えば原料合金の粉碎、磁界中成形、真空雰囲気中での焼結、熱処理、機械加工、表面コーティングなどの工程を行うことによって製造される。こうして作成されるR-TM-B系焼結磁石の密度は $7.5 \text{ g/cm}^3$ 以上、結晶粒径は $1 \sim 20 \mu\text{m}$ であることが好ましい。より好ましい結晶粒径の範囲は $5 \sim 10 \mu\text{m}$ である。

#### 【0054】

本実施形態におけるR-TM-B系焼結磁石は、パーミアンス係数が0.5以上での着磁状態にあり、吸収線量 $3,000 \text{ Gy}$ 以上の放射線に被曝させたとき、その表面磁束密度の低下率が5%未満となるように組成が調節されている。表面磁束密度の低下率が5%以上になると、磁気回路としての安定性に欠けるため好ましくない。また、パーミアンス係数が0.5未満となる形状を有する磁石は、磁石内部に発生する反磁界が大きくなるため、同じ条件で被曝させた場合でも表面磁束密度の低下率が大きくなる傾向がある。このため、本発明では、パーミアンス係数を0.5以上に限定している。

#### 【0055】

なお、本明細書において、磁石の吸収線量とは、被曝時間の長短にかかわらず、磁石が吸収した線量の総和を表すものとする。 $3,000 \text{ Gy}$ の吸収線量は、磁石が $1 \text{ kG}$ 当たり $3,000 \text{ J}$ の放射線エネルギーを吸収したときの線量を意味する。

#### 【0056】

$1 \text{ kG}$ の磁石が $3,000 \text{ J}$ の放射線エネルギーを吸収し、そのエネルギーがすべて熱に変換された場合における磁石の温度上昇を見積もると、磁石の比熱を $0.5 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$ として、磁石全体の温度上昇は $6 \text{ K}$ となる。 $6 \text{ K}$ の温度上昇は、熱減磁が大きな問題となるような大きさではない。しかし、従来の磁石では、

前述したように、局所的な温度上昇によっても磁化反転が生じ、表面磁束密度の低下が起こる。

【0057】

【実施例】

(実施例1)

まず、表1に示すように、Nd、Dy、B、Fe、および不可避免的に含有される元素を含む組成のR-TM-B系原料粉末を用意した。粉末の平均粒径は3.0  $\mu\text{m}$ であった。この粉末を磁界中で成形した後、真空中において1060℃、4 hの焼結を行い、焼結磁石素材を作製した。この焼結磁石素材から採取した試験片の着磁後における磁気特性（室温）を表2に示す。また、表2には、各焼結磁石素材のキュリー点（ $T_c$ ）を記載している。

【0058】

【表1】

	No.	磁石組成（質量％）			
		Nd	Dy	B	Fe
実施例	1	21.0	10.0	1.0	残部
	2	23.5	7.5	1.0	残部
	3	26.0	5.0	1.0	残部
比例較	4	28.5	2.5	1.0	残部
	5	31.0	—	1.0	残部

【0059】

【表 2】

	No.	Br (T)	HcJ (MA/m)	(BH) max (kJ/m <sup>3</sup> )	キュリー点 (℃)
実 施 例	1	1.15	2.4	255	316
	2	1.21	2.0	279	316
	3	1.26	1.6	303	316
比 例 較	4	1.33	1.3	342	318
	5	1.39	0.9	374	316

## 【0060】

次に、得られた焼結磁石素材を機械的に加工し、着磁方向が10mm、磁化困難方向が34mm四方の直方体形状を有する磁石加工品を作製した。次に、これらの磁石加工品を、表1に示す各組成につき、2個ずつ着磁した。

## 【0061】

この後、同一組成を有する2個の磁石加工品のうちの一方向の磁石のN極と、他方向の磁石のS極とに、それぞれ、ポールピースを吸着させた。各ホールピースは、厚さ1mm、長さ34mm四方の鉄板から作製した。さらに、両方のポールピース同士を、スペーサーを挟んで吸着させ、1対の磁石試料を完成させた。スペーサーは、厚さ1.65mm、長さ34mm四方の亚克力板から作製し、スペーサーの中央部には巾5mmの欠落部を設けた。この欠落部からガウスメータのホール素子を挿入し、ギャップ間の中心における磁束量を測定できるようにした。このようにして作製した磁石試料のパーミアンス係数 $P_c$  ( $B/\mu_0 H$ )の平均値は1.2であった。

## 【0062】

上記磁石試料を、陽子シンクロトロン加速器の主リングのビーム取り出し口に設置されたセプトム電磁石のそばに配置した。磁石試料とビームラインとの距離は85cmに設定した。

## 【0063】

次に、加速された陽子がビームラインの配管と衝突する際に発生する中性子によって磁石試料を被曝させた。磁石試料の吸収線量は、磁石試料のそばに設置したアルミニウム試料の放射化の程度によって測定した。磁石試料の吸収線量が3, 500 Gyに達したとき、磁石試料の中心磁束を測定した。被曝前の測定値と比較して、被曝前後における表面磁束の低下率を求めた結果を表3に示す。

【0064】

【表3】

	No.	中心磁束の低下率 (%)
		$P_c = 1.2$
実施例	1	1.0
	2	3.3
	3	5.0
比較例	4	8.3
	5	38.7

【0065】

(比較例1)

表1に示した組成を有する焼結磁石を実施例1と全く同様の製造条件で作製し、表2に示す磁気特性を有する焼結磁石素材を得た。得られた磁石素材について、実施例1と同様の機械加工と被曝試験を行った。表3には、磁石の吸収線量が3, 500 Gyに達したときの磁石試料（比較例1）の中心磁束の低下率を示している。

【0066】

表3から、実施例1～3については、3, 500 Gyの吸収線量に達するまで放射線に被曝させた場合でも、表面磁束の低下率が5%以下に抑えられることがわかる。このような表面磁束の低下率は、実用的に問題のないレベルである。これに対し、比較例1～2では、表面磁束の低下率が5%を越えている。

【0067】

表2に示すように、実施例と比較例との間にキュリー点の差異はほとんどない。図1を参照しながら説明した考え方によれば、キュリー点が同レベルにあれば、保磁力の大きさによらず、放射線照射による減磁は同程度に進行すると考えるべきであるが、実際には、保磁力が高いほど減磁率が小さくなるという予想外の結果が得られた。

#### 【0068】

##### (実施例2)

まず、Nd、Dy、B、Fe、および不可避免的に含有される元素からなる組成を有し、平均粒径が $3.0\mu\text{m}$ のR-TM-B系原料粉末を用意した。この粉末を磁界中で成形した後、真空中で $1060^{\circ}\text{C}$ 、4hの焼結を行った。こうして、Ndが28.5質量%、Dyが2.5質量%、Bが1.0質量%、Coが1.0質量%、残部がFeからなる組成の焼結磁石素材を作製した。これらの焼結磁石素材から採取した試験片の着磁後の室温における磁気特性は、 $B_r$ が1.33T、 $H_{cJ}$ が $1.3\text{MA/m}$ 、 $(BH)_{\text{max}}$ が $342\text{kJ/m}^3$ であった。

#### 【0069】

次に、上記の焼結磁石素材を機械的に加工して、直方体磁石を作製し、着磁した。着磁後の直方体磁石を用いて、図3に示す構成の磁界発生装置を組み立てた。なお、図3に示す個々の各磁石領域を一個の磁石素材で構成することは困難であるため、多数の小さな磁石素材ブロックを相互に接着することにより、図3の磁界発生装置を組み立てた。

#### 【0070】

このような磁界発生装置において、対向させた鉄製シムの間に発生する磁界は1.10Tであった。本実施例における鉄製シムの各々は、対向面側に傾斜部を有している。この傾斜部の存在により、対向する鉄製シムの間隔が図3のX軸に沿って変化している。鉄製シムの形状を適切に設計することにより、発生磁界の均一度を高めることができる。図3における磁界強度のX軸方向における均一性は、装置の略中央に位置する磁界発生空間において $\pm 3\%$ 以内であり、また、図3における磁界発生装置の左側の位置における漏洩磁界は1.4mTであった。

#### 【0071】

作製した磁界発生装置をセプタム磁石として実際の粒子加速器に組み込む場合には、図3に示したように磁界発生部の中心にキッカー磁石から分岐されたビームトランスポートのステンレス管を挿入し、図3の左側の鉄板の磁気シールドの外側に主リングのビームラインのステンレス管が通るように磁界発生装置を配置すればよい。このとき、ビームトランスポートのステンレス管には1.0 T以上の強い磁界で加速粒子を偏向することができる。

#### 【0072】

本実施例では、主リングのビームラインのステンレス管への漏洩磁界は小さいので、好ましくない偏向を加えるおそれがない。また、磁石中のCo含有料が少ないので、Sm-Co系焼結磁石を用いた磁界発生装置に比べて放射化に伴う磁界発生装置からの放射線の発生量も少ないと予想され、磁界発生装置のメンテナンスの際の作業者の被曝量を低減することが可能である。

#### 【0073】

実施例1の結果から、本願発明のHcJが1.6 MA/m以上の磁石を用いて実施例2に示した磁界発生装置を組み立てたとき、磁界発生装置を構成する磁石は加速器の運転中に発生する中性子により被曝しても減磁率が小さくできる。

#### 【0074】

このようにして、電力消費や冷却水の循環なしに安定で均一度の高い静磁界の発生が可能で、かつ加速器運転時に発生する放射線に被曝しても発生磁界の低下がなく、従来の電磁石式のセプタム磁石と同等の機能を有するNd-Fe-B永久磁石式のセプタム磁石を提供できることがわかる。


#### 【0075】

##### 【発明の効果】

本発明によれば、Nd-Fe-B系磁石を用いながら、放射線照射によっても減磁しにくい粒子線加速器用永久磁石と磁界発生装置を提供することができる。本発明によれば、電磁石のように多量の電力を消費することなく、粒子加速器用途に必要な強い磁界を発生することができる。

##### 【図面の簡単な説明】

##### 【図1】



放射線に被曝した磁石の結晶構造を表す模式図である。図中の丸印は、磁石を構成する原子を表している。

**【図 2】**

本発明の永久磁石が好適に用いられる粒子線加速器の構成を模式的に示している図である。

**【図 3】**

永久磁石を用いたセプタム磁石の構造を示す模式的斜視図である。

**【符号の説明】**

MR 主リング

S 1 ～ S 3 セプタム磁石

K キッカー磁石

A 第 1 磁石領域

B 第 2 磁石領域

C 第 3 磁石領域

D 第 4 磁石領域

E 第 5 磁石領域

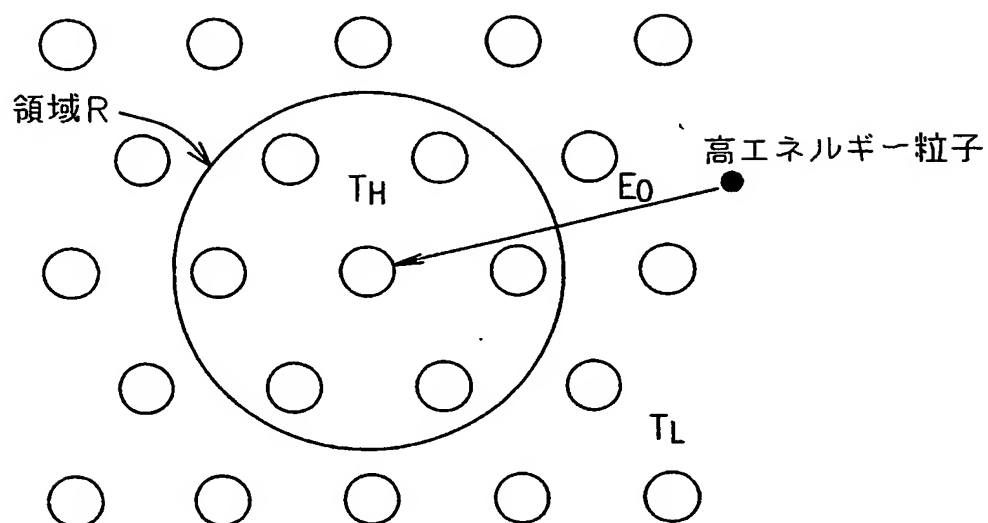
F 第 6 磁石領域

G 第 7 磁石領域

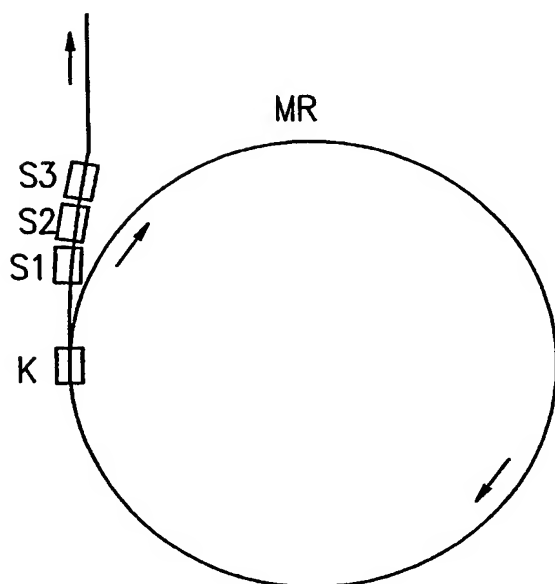
【書類名】

図面

【図 1】

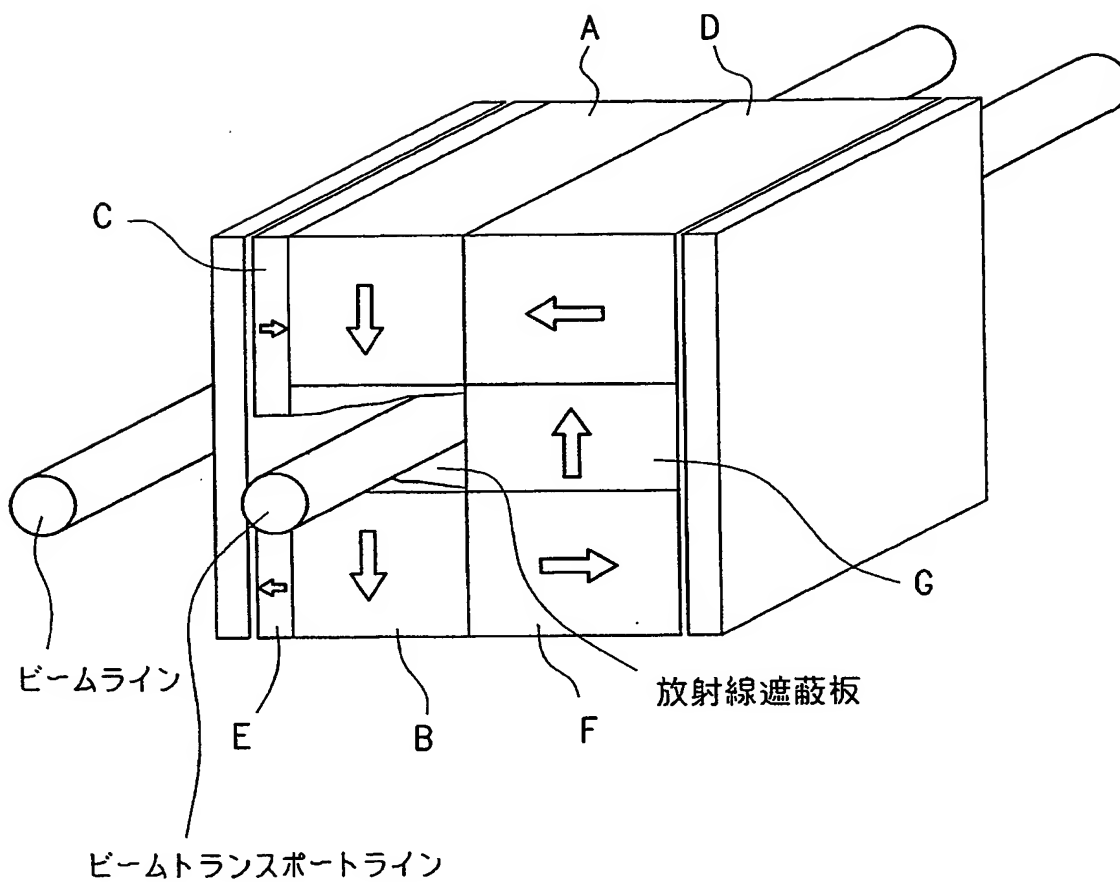


【図 2】





【図 3】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 Nd-F e-B系磁石を用いながら、放射線照射によっても減磁しにくい粒子線加速器用永久磁石と磁界発生装置を提供することができる。

【解決手段】 吸収線量 3, 000 Gy 以上の放射線に被曝される環境で使用される粒子線加速器用永久磁石であって、R（希土類元素のうちの少なくとも1種）、B、TM（遷移元素のうち少なくとも1種で、F eを含有する）：残部、および不可避免的に含まれる不純物元素を含有し、パーミアンス係数が0.5以上の着磁状態にあり、かつ保磁力  $H_{cJ}$  が 1.6 MA/m 以上の焼結磁石である。

【選択図】 図3

特願 2003-050541

出願人履歴情報

識別番号

[000183417]

1. 変更年月日

1990年 8月13日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番19号

氏 名

住友特殊金属株式会社

特願 2 0 0 3 - 0 5 0 5 4 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 3 9 1 0 1 2 7 0 7 ]

1. 変更年月日

1 9 9 7 年 5 月 2 2 日

[変更理由]

名称変更

住 所

茨城県つくば市大穂 1 番地 1

氏 名

高エネルギー加速器研究機構長